

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СЕКТОРА МНОГОГОРЕЛОЧНОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТД

Юрина А.Ю., Токарев В.В., Шмотин Ю.Н.

ОАО «НПО «САТУРН», г. Рыбинск

Целью, которой пытаются достигнуть инженеры в области создания современных камер сгорания газотурбинных двигателей, является создание камеры с низкими уровнями эмиссии вредных веществ, высокой эффективностью рабочего процесса и широкими диапазонами устойчивой работы. Для уменьшения выбросов окислов азота широко используется сжигание бедной предварительно перемешанной смеси [1]. Этот процесс обычно осуществляется при помощи закрученной струи, формируемой на выходе из кольцевого лопаточного завихрителя. Сильное влияние закрутки на инертные и реагирующие течения давно хорошо известно и изучается на протяжении многих лет. Применение закрученных струй в камерах сгорания газотурбинных было обусловлено следующими её преимуществами, в сравнении с прямоточной струёй – повышенная эжекционная способность, интенсивный турбулентный обмен, расширенные эффективные границы зон рециркуляции, способствующих стабилизации горения и эффективному массообмену с активным потоком и уменьшение дальнобойности.

Особенностью работы кольцевой камеры сгорания является то, что взаимодействие закрученных струй существенно влияет на процессы в камере сгорания. В связи с выше сказанным, представляется целесообразным провести исследование взаимодействия закрученных струй применительно к камере сгорания газотурбинного двигателя.

Цель данной работы заключалась в том, чтобы, основываясь на численном эксперименте, оценить качество (скорость) перемешивания топливовоздушной смеси, показать структуру течения внутри жаровой трубы многогорелочной камеры сгорания, а также проверить влияние постановки задачи на результаты расчета.

Объектом исследования является кольцевая камера сгорания с общим числом завихрителей равным восьмидесяти. Осевые плосколопа-

точные завихрители расположены в два ряда в шахматном порядке. Отверстия для подвода вторичного воздуха были закрыты. Все воздушные и топливные струи были закручены по часовой стрелке. Степень дифрагмирования выходного сечения завихрителя $\frac{d}{D}=0,5$.

Численный эксперимент проводился с помощью коммерческого газодинамического пакета CFX-TASCflow. Расчет выполнялся на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS). Для описания поведения турбулентного сжимаемого теплопроводного потока газа был применен метод контрольных объемов, который позволяет получить любой газодинамический параметр в любой точке расчетной области.

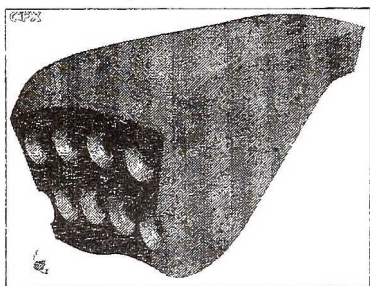


Рис. 1. Схема расчетной области ($\alpha_{\text{сум.кв}}=0.64$)

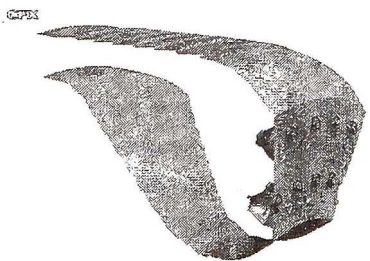


Рис. 2. Схема расчетной области ($\alpha_{\text{сум.кв}}=1.35$).

В данной работе авторами выбрана SST/к- ϵ модель турбулентности для описания течения в камере сгорания, с использованием пристеночной функции для описания течения вблизи стенки. Такой выбор сделан на основании анализа работ [2,5,6], посвященных исследованию и математическому моделированию закрученных течений, а также на основании результатов и выводов экспериментального исследования закрученного течения представленных в работе [4]. Кроме того, авторами предварительно было проведено тестирование газодинамического пакета с использованием экспериментальных данных взятых из работы [3]. Был выполнен расчет одного горелочного модуля, отличающегося от горелок, исследуемых в данной работе, углом установки лопаток, и

который равнялся 30° , в результате было получено хорошее согласование результата расчета и эксперимента (в данной работе результаты этого тестирования не приводятся).

Для выявления взаимодействия закрученных струй рассматривалось течение в секторе кольцевой камеры сгорания размером в 36° , таким образом, в расчетную область попадало восемь завихрителей. На границе сектора задавалось граничное условие типа «периодичность». На рис.1, 2 представлена геометрия расчетной области. Угол установки лопатки в завихрителе равен 45° . Для задания закрутки потока на выходе из топливной форсунки задавались окружная и радиальная

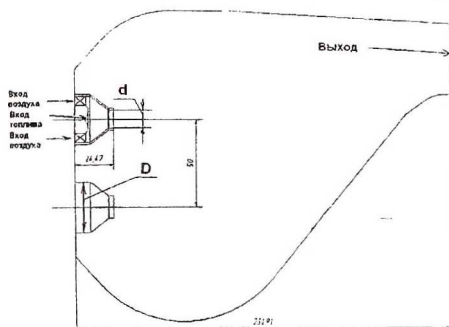


Рис. 3. Схема расчетной области

компоненты скорости струи топлива (метан) под углом 45° к оси завихрителя. При моделировании закрутки струи воздуха моделировались межлопаточные каналы. Было проведено два расчета: без учета горения и с горением.

При моделировании процесса горения использовалась EDM (Eddy Dissipation model - модель диссипации вихря) модель горения. Предполагалось, что скорость процесса горения определяется по закону Аррениуса:

$$\kappa = A \cdot T^n \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \cdot c_m^a \cdot c_o^b. \quad (1)$$

Константы для уравнения Аррениуса заимствованы из [8]:

$A = 2,8 \cdot e + 12$ – предэкспоненциальный множитель;

$\frac{E}{R} = 24370,5$ – отношение энергии активации к универсальной газовой

постоянной;

$n = 0, a = -0,3, b = 1,3$ – показатели степени;

c – содержание компонента в смеси: m – топливо, o – окислитель.

Предполагалось, что реакция горения протекает по одноступенчатой схеме:



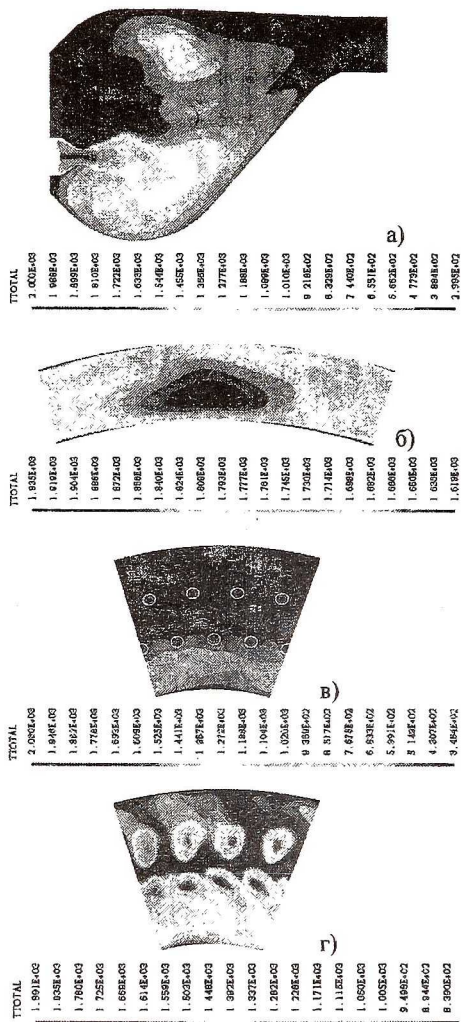


Рис. 4. Распределение полной температуры в характерных сечениях камеры сгорания в случае отсутствия охлаждающего воздуха: а) продольное сечение, б) выходное сечение, в) в плоскости выходного сечения горелок, г) на расстоянии 47 мм от выходного сечения горелок.

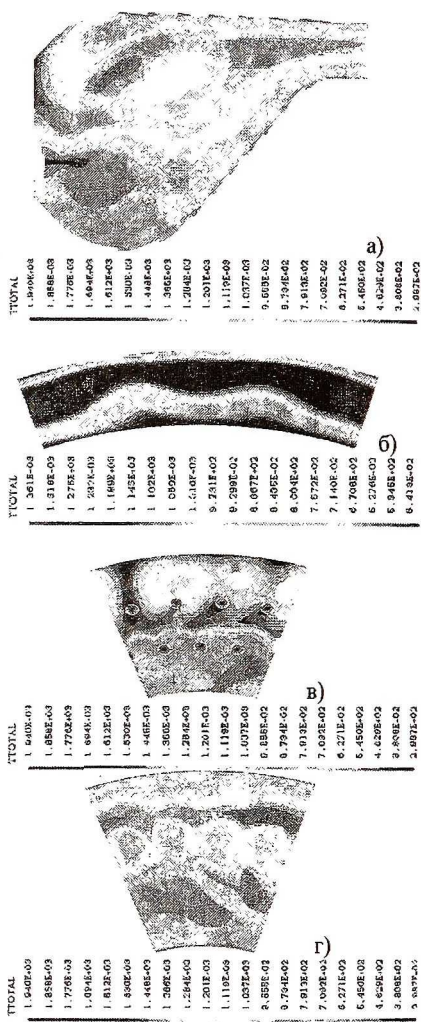
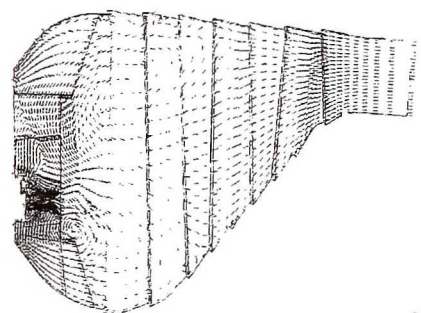
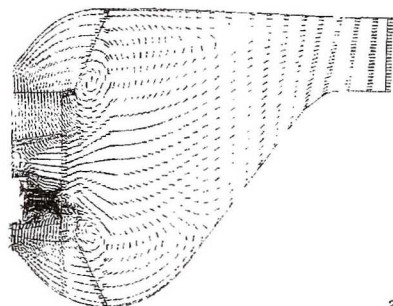


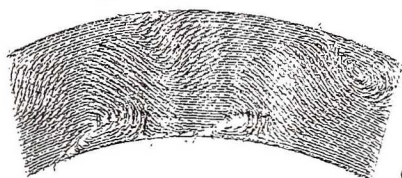
Рис. 5. Распределение полной температуры в характерных сечениях камеры сгорания при наличии охлаждающего воздуха: а) продольное сечение, б) выходное сечение, в) в плоскости выходного сечения горелок, г) на расстоянии 47 мм от выходного сечения горелок.



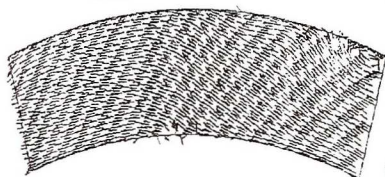
а)



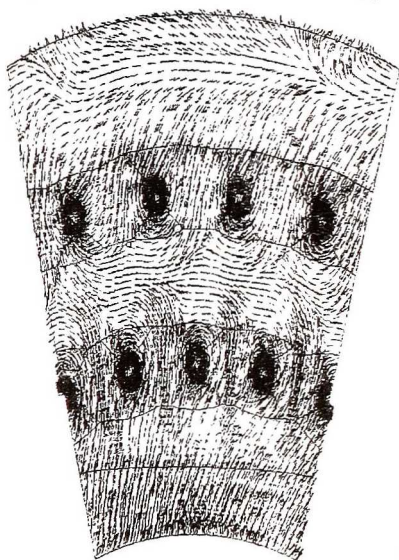
а)



б)



б)



в)

Рис. 6. Направление векторов скорости в характерных сечениях камеры сгорания в случае отсутствия охлаждающего воздуха: а) продольное сечение, б) выходное сечение, в) в плоскости выходного сечения горелок

Рис. 7. Направление векторов скорости в характерных сечениях камеры сгорания в случае отсутствия охлаждающего воздуха: а) продольное сечение, б) выходное сечение

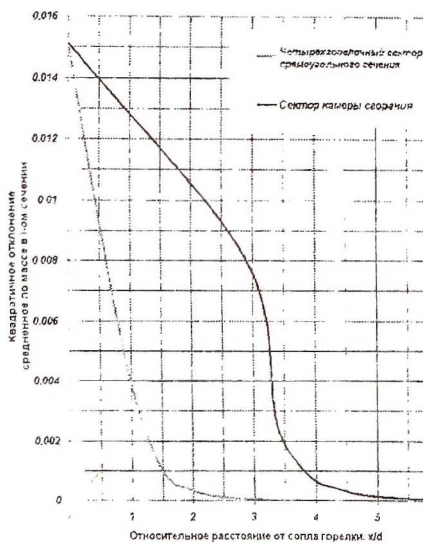


Рис. 8. Распределение интегральной величины квадратичного отклонения вдоль расчетной области

Расчет без учета горения был проведен с целью оценки качества перемешивания топлива с воздухом в объеме жаровой трубы. Ранее нами было проведено численное исследование влияния относительного расстояния между горелками на качество перемешивания в прямоугольном секторе. Некоторые результаты этой работы приведены в данной работе для сравнения качества перемешивания в секторе жаровой трубы, с качеством перемешивания в прямоугольном четырехгорелочном секторе. В табл.1 приведены данные по сектору камеры сгорания и данные, взятые из результатов исследования четырехгорелочного модуля, причем представлены результаты той конфигурации четырехгорелочного сектора, в котором получено самое низкое качество перемешивания. Для оценки качества перемешивания топлива с воздухом было выполнено следующее: а) определено среднеквадратичное отклонение (σ_i) локальной концентрации топлива, осредненное по расходу смеси в 46-ти сечениях, расположенных за горелкой;

б) построены графики зависимости $\sigma_i(x)$;

в) полученная зависимость была проинтегрирована вдоль оси x .

Методика определения качества перемешивания. Осредненное по расходу квадратичное отклонение местной концентрации метана в топливовоздушной смеси от среднемассовой концентрации в i -ом сечении:

$$\sigma_i = (CH_{4\text{cp}i} - CH_{4\text{м.с}})^2_{\text{cp},i}, \quad (3)$$

где CH_4 - концентрация топлива, в массовых долях;

$CH_{4\text{cp}i}$ - осреднение по расходу в i -ом сечении сектора;

j, i - местное значение.

Интегральная величина квадратичного отклонения:

$$\Sigma = \int_0^x \sigma_i dx \quad (4)$$

График зависимости $\sigma_i(x)$ представлен на рис.8.

Таблица 1. Интегральная величина квадратичного отклонения Σ .

Обозначение варианта	Расстояние между осями горелок, мм	Отношение суммарной площади сечений всех горелок данного сектора к площади фронта сектора, $F = \frac{F_{\phi}}{F_{с. \text{ ф. м.}}}$	Интегральный параметр квадратичного отклонения по качеству перемешивания, Σ
Четырехгорелочный сектор	50	31.83	0.01393
Сектор кольцевой кс	41—внешний ряд; 33—внутренний ряд	42	0.03761

Для сравнения, на рис. 8 приведен график, на котором представлены данные по распределению качества перемешивания по направлению от горелок к выходу из камеры сгорания для прямоугольного четырехгорелочного сектора и для сектора кольцевой камеры сгорания. Из рис. 8 очевидно, что в камере полная однородность смеси достигается на расстоянии 6 калибров, что в два раза превышает аналогичное расстояние для четырехгорелочного сектора.

Расчет с учетом горения проведен для сектора, в котором охлаждающий воздух на стенки трубы не подавался ($\alpha_{\text{сум. кс}} = 0,64$), и расчет, в котором подавался охлаждающий воздух ($\alpha_{\text{сум. кс}} = 1,35$). На рис. 4–7 приведены результаты расчета камеры сгорания для сравнения двух вариантов постановки задачи. Можно заметить, что подача охлаждающего воздуха на стенки значительно отражается на поле температур и при исследовании камер сгорания пренебрегать охлаждающим воздухом никак нельзя, тем более в камерах, подобных данной модели, где на охлаждение стенок идет порядка 25% от суммарного расхода воздуха. Взаимодействие основного потока с охлаждающим воздухом привело к появлению пиков температур в выходном сечении камеры сгорания.

Выводы:

1. Проведено численное исследование сектора многогорелочной камеры сгорания без учета горения и с учетом горения.

2. По результатам изотермического расчета проведена оценка качества (скорости) перемешивания топливовоздушной смеси вдоль жаровой трубы.

3. Основываясь на результатах расчета с учетом горения, показана структура потока и температурное поле в жаровой трубе.

4. Приведено сравнение полученных результатов для двух способов постановки задачи: без охлаждающего воздуха и с охлаждающим воздухом. Результаты свидетельствуют, что пренебрегать охлаждающим воздухом при исследовании подобных камер сгорания нельзя.

5. Следующий планируемый этап данной работы – анализ структуры потока в жаровой трубе с целью выявления причин пиков температуры в выходном сечении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов Н.Д., Токарев В.В. Многогорелочные камеры сгорания – одно из перспективных направлений развития двигателей. // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1995. № 2.
2. Гупта А.И. Закрученные потоки. – М.: Мир, 1987. – 588 с.
3. Исследование распыла топлива и смесеобразования в головной части камеры сгорания двигателей типа «НК». / Васильев А.Ю., Майорова А.И., Свириденков А.А., Третьяков В.В., Ягодкин В.И. // Вестник СГАУ, № 2 (2), 2002 г.
4. Сийержич М., Менстер Ф. Измельчение расчетной сетки при моделировании закрученного двухфазного течения. // Теплофизика и аэромеханика, 2003, том 10, №2.
5. Халатов А.А. Теория и практика закрученных потоков. – Киев: Наук. Думка, 1989. – 192 с.
6. Казаков А.В. К расчету закрученных турбулентных течений вязкого теплопроводного газа с объемным подводом энергии. // Теплофизика высоких температур, 1999, том 37, №5.
7. Характеристики закрученных струй в изотермических условиях и при горении. / Фудзи С., Эгутти К., Гоми М. // Ракетная техника и космонавтика, 1990. №3.
8. Бабушок В.И., Дакданча А.И. Глобальные кинетические параметры для высокотемпературных газофазных реакций. // Физика горения и взрыва. 1993. № 4